

Er:YAGレーザー光伝送システムとその医療応用に関する研究

著者	岩井 克全
号	2945
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/8218

氏名	いわ い かつ まさ 岩 井 克 全
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	Er:YAG レーザ光伝送システムとその医療応用に関する研究
指導教官	東北大学教授 宮城 光信
論文審査委員	主査 東北大学教授 宮城 光信 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学助教授 松浦祐司 東北大学助教授 石 芸尉

論文内容要旨

波長 $2.94\ \mu\text{m}$ で発振する Er:YAG レーザは、水への高い吸収係数ゆえに医療用レーザとして注目されているが、レーザ光を実用に供するための伝送システムはまだ確立されていない。本論文は、中空ファイバによる医療用 Er:YAG レーザ光伝送システムを構築するために各種のレーザ治療に必要な光学素子の製法、およびその特性をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。Er:YAG レーザ光 ($2.94\ \mu\text{m}$) は水が主成分の人体軟組織の除去、蒸散に適しており、医療用レーザとして注目されている。赤外光をフレキシブルに伝送するファイバは最小侵襲治療や歯科無痛治療、結石破碎といった医療技術への利用が考えられ、早期実現が必要とされている。しかしながら、赤外光伝送システムについての研究はまだ、確立されていないというのが現状である。本研究では、Er:YAG レーザ光伝送システムを赤外光伝送路として有望なポリマー内装中空ファイバを基盤する光学素子を用いて構築し、Er:YAG レーザ光伝送システムを耳鼻咽喉科におけるラリngoマイクロサージェリーならびに泌尿器科領域における結石破碎治療に医療応用することを目的としている。

第2章では、Er:YAG レーザ光用の高耐久性フレキシブル伝送路の実現を目指し、製作プロセス時におけるファイバ強度劣化を防ぐためのポリマー層を付加したファイバの製法について述べている。喉頭に挿入して使用するラリngoチップのようなデバイスには、半径 $40\ \text{mm}$ 以下の曲げに耐える大きな機械的強度をもつ中空ファイバが必要とされる。しかし従来の中空ファイバ製法では、ガラスキャピラリ内面に銀薄膜を形成する際に使用する溶液中の水分が、石英ガラス表面の微小欠陥生成を助長することがあり、十分な強度を有するファイバを製造することが難しかった。そこでガラスキャピラ

リ内面にポリマー保護膜を形成した後に、銀鏡反応による銀薄膜形成を行うことを試みた。光学的に機能する内装ポリマー薄膜をさらに銀薄膜上に形成するが、その際の過熱・乾燥工程において、ファイバ強度が著しく低下することがある。そこで、製作した銀内装中空ファイバを150℃まで加熱して、その最小曲げ半径を調べることにより、ポリマー保護膜の効果を調べた。保護ポリマーの膜厚が0.2 μm 以上の時、150℃に加熱しても機械的強度に変化はなく、最適なポリマー膜厚を実験的に求めることにより最小曲げ半径4 cmという高強度中空ファイバの製作に成功した。

第3章では、中空ファイバにレーザ光を入射する際の光学アライメント許容性を高めるためのテーパ型入射結合器の設計を、光線追跡法によって行う手法について述べている。中空ファイバの内部に形成された金属・誘電体の2層構造を、仮想的に単一層に置き換えて計算を行うことにより、計算時間を1/4に短縮することが可能となった。内径が0.7 mmのファイバ用に最適なテーパ形状の設計後、実際にその製作を行い、伝送特性を評価した結果、最適形状は設計と一致し、伝送損失はテーパ+ファイバ(長さ1 m)で0.7 dB程度と実用的に使用可能な入射系の実現に成功した。

第4章では、耳鼻咽喉科における声帯ポリープの除去手術用装置を実現するために、先端が湾曲した中空ファイバを用いたラリンゴチップの製作について述べている。可視パイロット光の伝送損失を低減するために、銀成膜プロセスの前処理として SnCl_2 溶液による活性化を行うことにより、ファイバ内面粗さの低減を図った。内径が0.7 mmの伝送系で製作したラリンゴチップ+ファイバ(長さが2 m)の可視パイロット光伝送損失は4.5 dBと従来の手法より損失値を半減することに成功した。このラリンゴチップはすでに医療現場で実用化されている。

第5章では、中空ファイバ用ガラスシーリングキャップを、泌尿器科における結石破碎をはじめとする各種の治療に用いるために、キャップの耐エネルギー特性ならびに集光特性について検討を行っている。結石破碎に於いては、中空ファイバ先端はシールドされている必要がある。そこで、人体に対して全く無害で、しかも比較的高い透過率を持つ石英ガラスキャップで中空ファイバ先端を封止した先端デバイスの検討を行った。検討する各種先端形状のシーリングキャップを図1に示す。キャップの左端面、及び右端面の形状を考慮し、キャップの名称をつけた。用いる中空ファイバの内径は0.7 mmであり

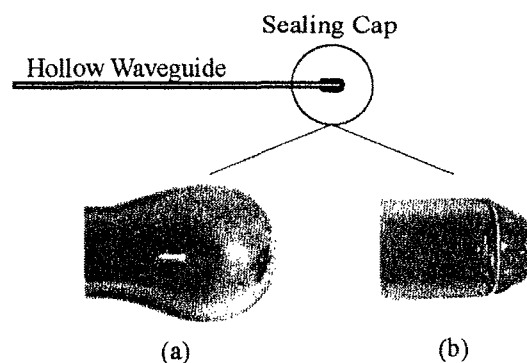


図1 各種先端形状のシーリングキャップ
(a) ドーム型、(b) 平凸型

実験に用いる Er:YAG レーザのパルス幅は 250 μ s、パルス繰り返し周波数は全て 10 Hz で行った。水中での収束特性を見るために、生理食塩水 (NaCl の濃度 0.9 wt%) 中で、出射エネルギー 160 mJ のレーザ光を照射した結果を図 2 に示す。ドーム型キャップは、収束効果がないのに対して、平凸型キャップは、収束特性を有していることが分った。石英キャップは出射エネルギー 300 mJ、60 分間の水中照射を行っても損傷なく使用でき、先端形状を平凸型に加工することにより空気中ならびに水中でキャップ先端から数 mm の距離に収束効果をもつことが確認された。

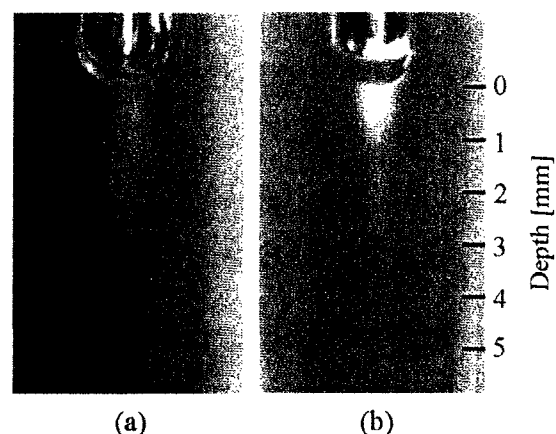


図 2 水中での収束特性
(a) ドーム型、(b) 平凸型

第 6 章では、Er:YAG レーザ光を中空ファイバで伝送し、生理食塩水中で各種結石の破碎実験を行った結果について述べている。Er:YAG レーザ光をフレキシブルに伝送する中空ファイバと機能性を有するシーリングキャップを用い、生理食塩水中で結石の破碎実験を試みた。実際の膀胱結石サンプルを用いドーム型と平凸型のシーリングキャップの破碎形状について測定を行った。図 3 (a) はドーム型キャップを用いた場合である。破碎形状は U 字形であり、溝の深さは 1.5 mm 程度であった。図 3 (b) に平凸型キャップを用いた場合の破碎形状を示す。破碎形状は V 字形であり、溝の深さは 3 mm 程度であった。シーリングキャップの出射ビームの形状及び侵達長と、結石の破碎形状及び溝の深さの傾向は一致している。結石破碎にはドーム型キャップよりも平凸型キャップを用いることが有効であることが分った。平凸型シーリングキャップを用い、出射エネルギー 200 mJ のレーザ光を腎結石に照射した際の写真を図 4 に示す。

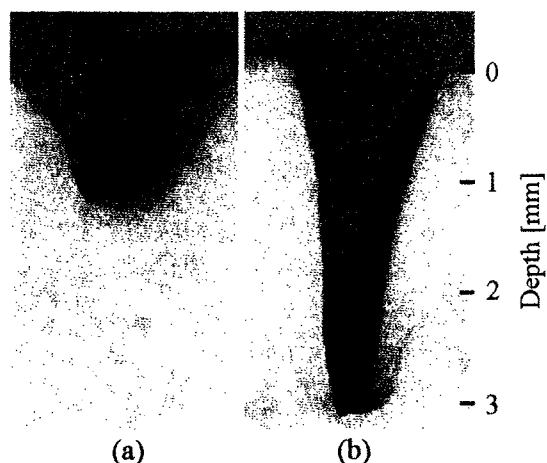


図 3 膀胱結石の破碎形状
(a) ドーム型、(b) 平凸型
但し、出射エネルギー 160 mJ で照射時間は 3 分である。

17 分 30 秒間のレーザ照射で結石を 15 mm 程度の大きさに 4 分割することができた(図 4 (b) 参照)。更に、レーザ光を 12 分 30 秒間照射した後の写真を図 4 (c) に示す。結石を 7 mm 程度の大きさに破碎することができた。中空ファイバと石英ガラスシーリングキャップの組み合わせにより、パルスエ

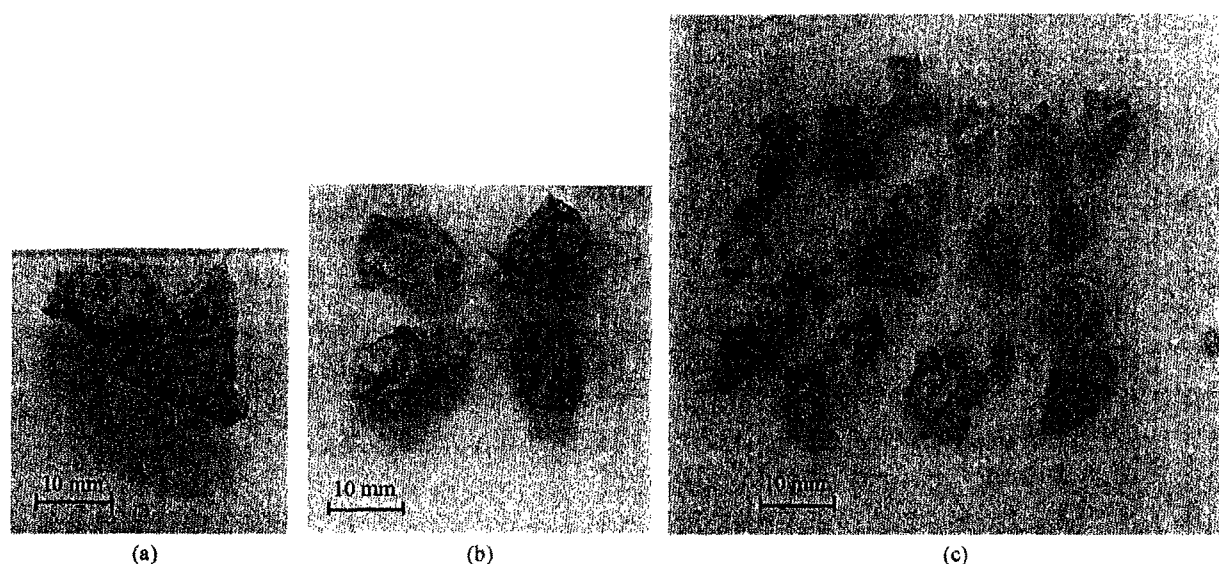


図4 Er:YAG レーザ光による腎結石破碎
(a) 照射前の腎結石、(b) レーザ照射、17 分 30 秒、(c) レーザ照射、～30 分後

エネルギー200 mJ 以上の高エネルギーEr:YAG レーザ光の伝送が可能となり、in vitro の結石破碎に初めて成功した。

第7章は結言である。本論文では、Er:YAG レーザ光の利用により効果的な治療が期待されている医療応用、特に耳鼻咽喉科においては声帯ポリープの除去、泌尿器科領域では結石破碎治療を実現するために、中空ファイバを基盤とする各種素子を用いて、医療用 Er:YAG レーザ光伝送システムを構築した。Er:YAG レーザ光伝送用の高強度ファイバを実現し、入射系としてはアライメントの許容範囲が大きく、低損失なテーパ型入射結合器を設計し製作した。また各種医療応用を実現するための先端素子としての声帯ポリープの除去に有効なラリンゴチップの製作を行い、可視パイロット光の伝送損失の改善を行った。先端封止素子としてシーリングキャップの材質ならびに先端形状について検討を行い、材質として耐エネルギー特性に優れた石英を用い、キャップ形状を収束特性を有する平凸型にすることにより結石破碎において有効な素子を実現した。医療応用として Er:YAG レーザ光を用いた in vitro での結石破碎を 200 mJ という高エネルギーで行い、直径 2 cm 以上の膀胱結石ならびに腎結石の破碎に成功した。

論文審査結果の要旨

波長 $2.94\ \mu\text{m}$ で発振する Er:YAG レーザは、水への高い吸収ゆえに医療用レーザとして注目されているが、レーザ光を実用に供するための伝送システムはまだ十分には確立されていない。本論文は、中空ファイバによる医療用 Er:YAG レーザ光伝送システムを構築するために、必要となる各種の光学素子の製法、およびその特性についてとりまとめたもので、全編 7 章よりなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、Er:YAG レーザ光用の高耐久性フレキシブル伝送路の実現を目指し、ファイバ強度劣化を防ぐためのポリマー層を付加したファイバの製法について述べている。最適なポリマー膜厚を実験的に求めることにより、内径 $700\ \mu\text{m}$ の中空ファイバで、最小曲げ半径 $4\ \text{cm}$ という高強度中空ファイバの製作に成功した。

第 3 章では、中空ファイバにレーザ光を入射する際の光学アライメントの許容性を高めるためのテーパ型入射結合器の設計を、光線追跡法によって行う手法について述べている。中空ファイバの内部に形成された金属・誘電体の 2 層構造を、仮想的な単一層に置き換えて計算を行うことにより、計算時間を $1/4$ に短縮することが可能となった。

第 4 章では、耳鼻咽喉科における声帯ポリープの除去手術用装置を実現するために、先端が湾曲した中空ファイバを用いたラリンゴチップの製作について述べている。可視パイロット光の伝送損失を低減するために、銀成膜プロセスの前処理として SnCl_2 溶液を用いて活性化を行うことにより、ファイバ内面粗さの低減を図った。このラリンゴチップはすでに医療現場で実用化されている。

第 5 章では、中空ファイバ用ガラスシーリングキャップを、泌尿器科における結石破碎をはじめとする各種の治療に用いるために、キャップの耐エネルギー特性ならびに集光特性について検討を行っている。

第 6 章では、Er:YAG レーザ光を中空ファイバで伝送し、生理食塩水中で各種結石の破碎実験を行った結果について述べている。中空ファイバと石英ガラスシーリングキャップの組み合わせにより、パルスエネルギー $200\ \text{mJ}$ 以上の高エネルギー Er:YAG レーザ光の伝送が可能となり、*in vitro* の結石破碎に初めて成功した。この成果は高く評価される。

第 7 章は結言である。

以上要するに本論文は、医療用 Er:YAG レーザ光伝送システムを、中空ファイバを基盤とする各種の光学素子を用いて構築したもので、光伝送工学ならびにレーザ応用工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。